

Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК 621.311

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по науке  
\_\_\_\_\_ Кружаев В.В.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013

## ОТЧЕТ

### О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.2.1.1.1 Плана реализации мероприятий Программы развития  
УрФУ на 2013 год

ПО ТЕМЕ:

«Интегральная оценка электрических подстанций с помощью методов искусственных  
нейронных сетей на основе данных технической диагностики»  
(Заключительный)

Зав.кафедрой

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Паздерин А. В.

Научный руководитель

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Кокин С. Е.

Исполнитель

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Хальясмаа А. И.

Екатеринбург 2013

## Реферат

1. **ФИО автора (ов):** Александра Ильмаровна Хальясмаа.
2. **Аннотация:** эта работа посвящена вопросам оценки технического состояния оборудования на электрических подстанциях напряжением 35-220 кВ с помощью методов искусственных нейронных сетей на основе данных технической диагностики. В работе рассматриваются принципы формирования математической модели для автоматизированной системы оценки технических активов сетевых предприятий. Представлена методика определения характеристических функций принадлежности к категории состояния оборудования, а также получение обобщенной оценки технического состояния оборудования.
3. **Ключевые слова:** нечеткая логика, искусственные нейронные сети, электротехническое оборудование, состояние.
4. **Тема отчета:** интегральная оценка электрических подстанций с помощью методов искусственных нейронных сетей на основе данных технической диагностики.
5. **Список научных работ по результатам проведенного исследования:**
  - Хальясмаа А. И., Дмитриев С. А., Кокин С. Е. Формирование системы оценки технического состояния оборудования подстанций на основе методов нечеткой логики // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. №6. 2013. С. 19-28. (рекомендовано ВАК РФ)
  - Alexandra I. Khalyasmaa, Stepan A. Dmitriev, Stanislav A. Eroshenko. Membership functions for the formation of the electrical equipment state estimation for power stations and substations // Advanced Materials Research. Vol. 694-697. P. 1329-1333. 2013. (индексировано в базе данных Scopus)
  - Alexandra I. Khalyasmaa, Stepan A. Dmitriev. Power equipment technical state assessment principles // 2nd International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE 2013), December 20-21, 2013, Paris, France. (индексировано в базе данных Scopus)

## Summary

1. **Autor:** Alexandra I. Khalyasmaa.

2. **Abstract:** this research is devoted to the assessment of the electrical equipment technical state at substations of 35-220 kV using the methods of artificial neural networks based on the technical diagnostics. This paper discusses the power equipment technical state assessment principles for the Enterprise Asset Management (EAM) systems of grid companies. Presents a methodology of determining the membership functions to the category of equipment state and obtaining the generalized assessment of the equipment technical state.
3. **Keywords:** fuzzy logic, artificial neural network, electrical equipment, state.
4. **Report title:** Substations technical state assessment using the artificial neural networks methods on the basis of technical diagnostics.
5. **Список научных работ по результатам проведенного исследования:**
  - Alexandra I. Khalyasmaa, Stepan A. Dmitriev, Sergey E. Kokin. System of the equipment technical condition estimation of substations based on fuzzy logic methods // Electro. Electrical, electronic, electrotechnical industry. №6. 2013. P. 19-28. (recommended by High Attestation Commission of Russian Federation)
  - Alexandra I. Khalyasmaa, Stepan A. Dmitriev, Stanislav A. Eroshenko. Membership functions for the formation of the electrical equipment state estimation for power stations and substations // Advanced Materials Research. Vol. 694-697. P. 1329-1333. 2013. (indexed by Scopus database)
  - Alexandra I. Khalyasmaa, Stepan A. Dmitriev. Power equipment technical state assessment principles // 2nd International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE 2013), December 20-21, 2013, Paris, France. (indexed by Scopus database)

## Содержание

Содержание .....	4
Обозначения и сокращения.....	5
Введение.....	6
Основная часть .....	7
Заключение .....	15
Список использованных источников .....	16
Приложения .....	17

## **Обозначения и сокращения**

**ИНС** – искусственные нейронные сети;

**ОТС** – оценка технического состояния;

**ППР** – планово предупредительные ремонты;

**ПС** – подстанция;

**ЭО** – экспертные оценки.

## **Введение**

Большинство предприятий электросетевого комплекса, на чьем балансе состоят электрические подстанции (ПС) 35 кВ и выше стремятся активно внедрить автоматизированные системы управления техническими активами, для повышения технической и экономической эффективности своей работы. Предприятия стремятся не только снизить риски, связанные с отказами и отключениями электрооборудования, но и максимально сократить затраты на эксплуатацию и ремонт электрооборудования, и что немаловажно, оптимизировать инвестиции в развитие технических активов.

Интерес сетевых компаний к системам управления техническими активами объясняется следующими причинами.

Во-первых, большая часть основного электротехнического оборудования на многих ПС отработала установленный парковый ресурс или определенный нормативными документами срок эксплуатации и работает на пределе своих возможностей.

Во-вторых, система планово-предупредительных ремонтов (ППР) электрооборудования сегодня, когда ПС являются собственностью предприятий электросетевого комплекса, а не находятся на балансе у государства, требует серьезных финансовых затрат и большой трудоемкости (иногда настолько большой, что для проведения работ недостаточно одного планового периода). Это характеризует систему ППР как недостаточно эффективную для предприятий электросетевого комплекса ни с технической, ни с экономической точки зрения. Поэтому большинство предприятий стараются перейти от системы ППР к системе обслуживания электрооборудования по фактическому состоянию.

Переход к обслуживанию по фактическому состоянию возможен только при условии использования методик и оборудования на основе методов неразрушающего контроля (методов технической диагностики) таких как: электрические, тепловые, оптические, акустические и др.

## Основная часть

В настоящее время диагностика электрооборудования с помощью методов неразрушающего контроля занимает очень важную и востребованную нишу на рынке услуг. Некоторые виды диагностики являются обязательными и регламентируются нормативными документами РФ для всех или практически всех видов электрооборудования. Поэтому статистика данных технической диагностики присутствует, в различном виде практически на любом энергетическом объекте, что дает возможность использовать эти данные для оценки состояния электрооборудования или интегральной оценки ПС, а также делать прогнозы об остаточном ресурсе электрооборудования.

В качестве подтверждения выше сказанному, был проанализирован крупный энергоузел электроэнергетической системы Свердловской области, состоящий из 106 ПС напряжением 35–220 кВ в период с 2007 по 2012 гг. Все ПС расположены в черте крупных городов, снабжающих в том числе промышленных потребителей. Суммарная установленная мощность силовых трансформаторов 1450 МВА. В таблице 1 представлены основные методы диагностики соответственно для каждого вида электрооборудования, которые производились за рассматриваемый период. [1]

Таблица 1

Методы диагностики электрооборудования на ПС 35-110 кВ

Вид оборудования	Методы диагностики электрооборудования				
	Тепловой	Хромато- графический	Акусти- ческий	Электри- ческий	Измерение тангенса угла диэлектрических потерь
Силовой трансформатор	+	+	+	+	+
Трансформатор тока	+	+			
Трансформатор напряжения	+				
Силовой выключатель	+				
Вентильный разрядник и ограничитель перенапряжений нелинейный	+				
Разъединитель	+				
Высоковольтные вводы силовых трансформаторов и опорные изоляторы	+	+	+	+	
Кабельная линия	+			+	
Воздушная линия	+				
Высокочастотный заградитель	+				

Из таблицы 1 видно, что для анализа технического состояния некоторых видов электрооборудования использовались сразу несколько видов диагностирования, что позволяет в некоторых случаях иметь дополнительную информацию о состоянии электрооборудования.

Использование системы обслуживания оборудования по фактическому состоянию недостаточно для повышения эффективности системы управления техническими активами. В первую очередь, необходима автоматизированная система, способная не только произвести анализ данных для оценки состояния оборудования, но и в дальнейшем способная оценить риски, а именно, последствия отказов электрооборудования.

Большинство предприятий электросетевого комплекса занимаются разработкой автоматизированных систем техническими активами. Реализация такой системы представляет собой очень сложную задачу, особенно с точки зрения разработки математической модели. Одной из подзадач автоматизированной системы управления техническими активами, как уже упоминалось выше, является оценка технического состояния (ОТС) электрооборудования.

#### **Методы математического моделирования**

Математическое моделирование таких объектов как ПС является тяжело реализуемой задачей, так как электрические системы относятся к классу сложных систем, в которых закон распределения воздействующих на систему параметров неизвестен и функционирование системы происходит в условиях неопределенности, а, следовательно, переменные системы могут иметь количественно-качественное описание.

Для моделирования ОТС электрооборудования на ПС применяют различные математические аппараты, но формирование исходной информации, независимо от метода построения модели, производится всегда.

В энергетике большинство исходных выборок (исходных данных) для систем ОТС электрооборудования строится на взаимодействии выборки экспериментальных данных (параметрах оборудования) и системе экспертных оценок (ЭО), где решения о состоянии электрооборудования принимаются на основе мнений квалифицированных специалистов по данным выборки экспериментальных данных.

Существует множество методов построения систем ЭО, некоторые из которых стали самостоятельными нормативными документами. Но большинство методов ЭО основаны на так называемых лингвистических переменных, значения которых по своей сути являются нечеткими множествами [2]. Это значит, что описание таких переменных носит субъективный характер и зависит от контекста, где они используются.



В большинстве автоматизированных систем управления техническими активами для ОТС с помощью ЭО вводятся термы, характеризующие состояние оборудования: непригодное, неудовлетворительно, удовлетворительно, хорошее и т.д. Градация состояний и их количество и представление могут быть различны, в зависимости от системы и назначения.

Система ЭО для таких нужд формируется на местах, а именно, персоналом на самих объектах (например, ПС и т.д.) и уже после этого вносится в общую систему. Это связано в первую очередь с большим количеством данных, поступающих в систему с каждого объекта и с достаточно высокой скоростью их обновления.

В зависимости от масштаба энергообъекта, его удаленности, класса напряжения, схемы ПС и т.д. квалификация персонала обслуживающий энергообъект будет различна, а значит ЭО будет не достаточно достоверной, так как все цело и полностью будет зависит от человеческого фактора.

Так как все предприятия пытаются перейти от системы ППР к системе обслуживания по фактическому техническому состоянию то вес ОТС оборудования и ответственность за принятые решения резко повышается. Поэтому система ЭО должна быть построена с максимально возможной достоверностью и точностью. [3]

Авторами для формирования ОТС в [4] было предложено использовать метод искусственных нейронных сетей (ИНС). В этом случае, начальная выборка будет формироваться единожды, а далее система уже будет обучаться самостоятельно. Это значит, что применение ЭО потребуется также единожды, что позволит повысить точность полученного результата.

Таким образом, для построения математической модели для систем оценки технического состояния оборудования на подстанциях 35-220 кВ имеет смысл использовать гибридные сети, объединяющие в себе методы нечеткой логики и методы искусственных нейронных сетей. [5] В этом случае для определения функции принадлежности используют нечеткие множества, а в качестве дефазификатора выступает ИНС. Такая реализация позволяет воспользоваться преимуществами обоих методов и при решении задачи ОТС, гибридные сети позволяют избавиться от "масштабности" исходных данных, и сделать базу данных более компактной, а базу знаний (правил) более эффективной.

В данном случае для решения задачи ОТС электрооборудования на подстанциях 35-220 кВ блок схема гибридного алгоритма обучения модуля нечеткого управления будет выглядеть следующим образом:



Рис. 1. Блок схема гибридного алгоритма обучения модуля нечеткого управления

Для интегральной ОТС ПС для каждого вида оборудования создается свой алгоритм обучения модуля нечеткого управления на основе данных технической диагностики, в результате которого определяется состояние для каждого объекта ПС:

- РУ 110 кВ;
- РУ 35 кВ;
- РУ 10 кВ;
- линии электропередачи;
- силовой трансформатор;
- трансформатор собственных нужд;
- РЗА;
- реакторы.

Такие объекты как РУ относятся к разряду комбинированных объектов, каждый из которых в свою очередь состоит из отдельных единиц, таких как:

- секции шин;
- выключатели;
- разъединители;

- трансформаторы тока;
- трансформаторы напряжения;
- ограничители перенапряжения.

Каждая единица состоит из компонентов, например для силового трансформатора это следующие компоненты:

- магнитная система;
- обмотки;
- масло;
- система регулирования напряжения;
- высоковольтные вводы;
- система охлаждения;
- бак и вспомогательные системы.

Таким образом, алгоритм обучения модуля нечеткого управления в данном случае используется для ОТС оборудования на трех этапах:

- на этапе ОТС каждой единицы оборудования (с учетом своих собственных компонентов);
- на этапе ОТС комбинированных объектов;
- на этапе ОТС объектов всей ПС.

Для системы ЭО целесообразно в таких ситуациях использовать методы нечеткой логики, а именно нечеткие множества. Любой нечеткий объект характеризуется функцией принадлежности, в данном случае функция принадлежности строится по ЭО [6].

При формировании функции принадлежности важными аспектами являются: тип шкалы, с помощью которого описывается функция принадлежности и характер измерений. [6]

Среди групп методов построения функции принадлежности, в данном случае применимы только косвенные методы, так как ЭО выступают в качестве исходной информации и далее дополнительно должны обрабатываться, для минимизации ошибки и определения значения степени принадлежности к какой-либо категории состояния.

Категория состояния представляет собой нечеткое определение, выраженное нечетким множеством. Для оценки предусмотрены следующие категории состояния: отличное  $H$ , хорошее  $SN$ , нормальное  $N$ , плохое  $SL$ , очень плохое  $L$ , которые являются лингвистическими термами.

Каждое из возможных состояний  $i$  определяется соответствующей функцией принадлежности  $(L-R)$  - типа  $\mu_i(x) \in R \rightarrow [0;1]$  (рис. 1), где  $R$  - множество действительных чисел,  $x$  - нечеткая оценка, выставляемая экспертом для объекта исследования.

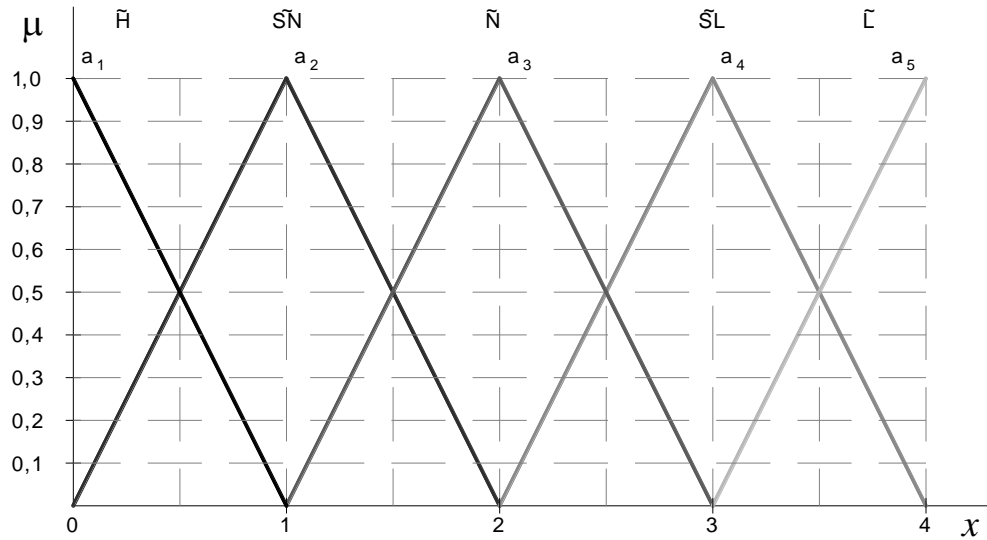


Рис. 1 – Функции принадлежности к категориям состояния в зависимости от нечеткой оценочной характеристики экспертов

Функция принадлежности к категории состояния  $i$  записывается в форме композиции  $L$  и  $R$  - функции в следующем виде:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right), & \text{если } a-\alpha < x < a; \\ 1, & x = a; \\ R\left(\frac{x-a}{\beta}\right), & \text{если } a < x < a+\beta; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha > 0$  и  $\beta > 0$  – левый и правый коэффициенты нечеткости соответственно, характеризующие границы категорий состояния, представленные в виде пороговых уровней,  $a$  – модальное значение характеристической функции принадлежности.

Мнения  $L$  экспертов относительно каждого признака работоспособности (показателя оценки)  $j$  объекта исследования  $k$ , формирующие множество нечетких оценок работоспособности элемента электрической сети  $X_{kjl}$ , формализуются путем преобразования к нормализованным значениям с использованием характеристических функций  $i$ . В таблице 2 приведена матрица обработки ЭО.

Таблица 2

Матрица обработки экспертных оценок

Показатель оценки	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Эксперт 4	Эксперт $l$
Показатель 1	$\mu_i(x_{k11})$	$\mu_i(x_{k12})$	$\mu_i(x_{k13})$	$\mu_i(x_{k14})$	$\mu_i(x_{k1l})$
Показатель 2	$\mu_i(x_{k21})$	$\mu_i(x_{k22})$	$\mu_i(x_{k23})$	$\mu_i(x_{k24})$	$\mu_i(x_{k2l})$
Показатель 3	$\mu_i(x_{k31})$	$\mu_i(x_{k32})$	$\mu_i(x_{k33})$	$\mu_i(x_{k34})$	$\mu_i(x_{k3l})$
Показатель $j$	$\mu_i(x_{kj1})$	$\mu_i(x_{kj2})$	$\mu_i(x_{kj3})$	$\mu_i(x_{kj4})$	$\mu_i(x_{kjl})$

Значения характеристических функций ЭО приводятся к их модальным значениям  $a_i$ , для которых  $\mu_i(x_{kjl}) = 1$ .

Обобщенная ОТС электрооборудования рассчитываются на основе средневзвешенной балльной оценки технического состояния. Для учета интенсивности проявления тех или иных свойств объектов электрической сети предложено использование шкалы Саати  $\{0;1;3;5;7\}$ . Соответственно балл 0 свидетельствует об отсутствии какой-либо значимости характеристики объекта исследования, 1 – об очень слабой значимости, 3 – о слабой значимости, 5 – более или менее существенной значимости, 7 – о сильной значимости оценки.

Шкала балльных оценок ставится в соответствие категориям технического состояния. Хорошему состоянию ставится в соответствие наименьшая значимость с баллом равным 0. Очень плохому – максимальный балл 4. Такая шкала позволяет минимизировать дисперсию обобщенной ОТС, существенно повысив значимость негативных оценочных характеристик.

Вычисление средневзвешенной нормализованной оценки для каждого показателя для объекта исследования выполняется по следующему выражению:

$$C_{kj} = \frac{\sum_{l=1}^L b_{lj} X_{kjl}^H}{\sum_{l=1}^L b_{lj}}, \quad (2)$$

где  $X_{kjl}^H$  – нормализованная ЭО  $l$  относительно показателя  $j$  объекта исследования  $k$ ,  $L$  – общее количество экспертов,  $b_{lj}$  – балл оценочной характеристики суждения эксперта  $l$  относительно показателя  $j$ .

Рассмотрим пример определения обобщенной ЭО произвольного показателя работоспособности. Предположим, что в опросе участвовало пять экспертов, каждый из которых дал свое определение состоянию (рис. 2).

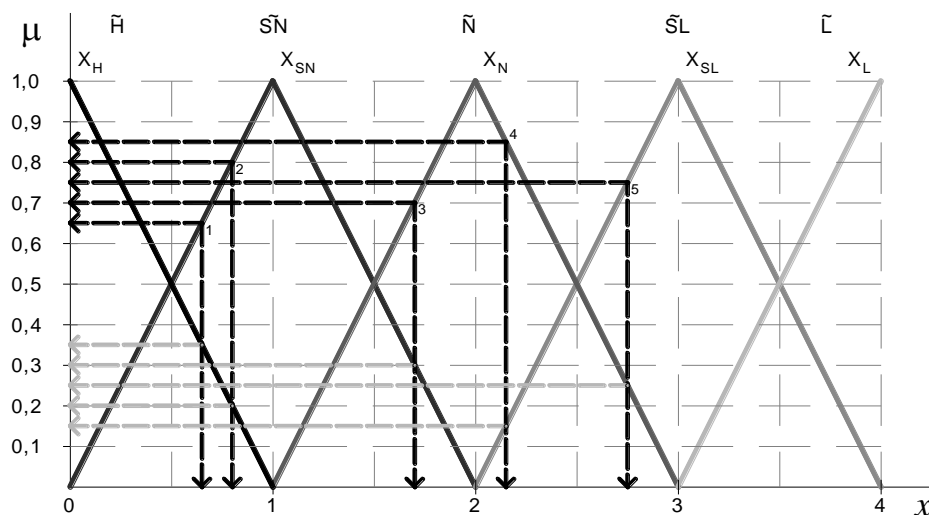


Рис. 2 – Диаграмма определения принадлежности оценочной характеристики категории состояния

Обработка мнений экспертов с помощью функций принадлежности позволяет установить категорию состояния. Результаты таких вычислений показаны в таблице 3.

Таблица 3

Принадлежность показателя категории состояния

Субъект оценки	Оценка $X$	$\mu_H$	$\mu_{SN}$	$\mu_N$	$\mu_{SL}$	$\mu_L$
Эксперт 1	0,65	0,35	0,65	0	0	0
Эксперт 2	0,80	0,2	0,8	0	0	0
Эксперт 3	1,70	0	0,3	0,7	0	0
Эксперт 4	2,15	0	0	0,85	0,15	0
Эксперт 5	2,75	0	0	0,25	0,75	0

Общая оценка по данному показателю рассчитывается по выражению:

$$C = \frac{\sum_{l=0}^L b_l X_l^H}{\sum_{l=0}^L b_l} = \frac{1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 3 + 3 \cdot 5}{1 + 1 + 3 + 3 + 5} = 2,23.$$

Полученное значение  $C = 2,23$  соответствует нормальному состоянию на 77% и плохому на 23%. Дефаззифицированное значение обобщенной ЭО равно 2 и соответствует нормальному состоянию.

Представленный подход позволяет дать обобщенной ЭО: как вербальные характеристики с учетом степени выраженности положительного эффекта, так и точные формализованные представления.

## **Заключение**

Оценка технического состояния основного оборудования подстанций является слабо формализованной задачей, которая может быть решена на основе обработки лингвистических переменных. Такие переменные позволяют получить качественную оценку категории состояния объекта исследования с помощью характеристических функций принадлежности. Последнее является задачей, требующей отдельного внимания, так как является первоочередным этапом моделирования гибридных сетей.

Применение средневзвешенных балльных оценок с использованием неравномерной шкалы позволяет получить количественную характеристику состояния электрооборудования. Все выше сказанное делает представленный подход универсальным с точки зрения обработки исходной информации, а также с позиции получения верифицированных оценок состояния.

Структура модели для автоматизированной системы оценки технического состояния электрооборудования на ПС 35-220 кВ, представленная в данной работе, является первым шагом для формирования интеллектуальных систем контроля оборудования.

## **Список использованных источников**

1. Система ППР оборудования [Электронный ресурс] // Информационный портал для главного механика: [сайт]. [2013]. URL: <http://themechanic.ru/article/read/sistema-ppr.html> (дата обращения: 20.05.2013).
2. Теория нечетких множеств и нейронные сети [Электронный ресурс] // Градосельская Г.В.: [сайт]. [2013]. URL: [www.hse.ru/data/944/072/1236/Gradoselskaya.doc](http://www.hse.ru/data/944/072/1236/Gradoselskaya.doc) (дата обращения: 20.05.2013).
3. Нейронная настройка лингвистических моделей [Электронный ресурс] // Matlab.Exponenta: [сайт]. [2001]. URL: [http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book5/6\\_1.php](http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book5/6_1.php) (дата обращения: 20.05.2013).
4. Хальясмаа А. И., Дмитриев С. А., Кокин С. Е., Осотова М. В. Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях // Вопросы современной науки и практики. №1(45). 2013.
5. Рутковская Д., Пилинский М., Л. Рутковский. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия - Телеком, 2006. 193 с.
6. Вдовико В. П. Методология системы диагностики электрооборудования высокого напряжения» // Электричество, №2, с. 14-20. (2010).



## Приложение

### Оттиски основных работ

- Хальясмаа А. И., Дмитриев С. А., Кокин С. Е. Формирование системы оценки технического состояния оборудования подстанций на основе методов нечеткой логики // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. №6. 2013. С. 19-28.
- Alexandra I. Khalyasmaa, Stepan A. Dmitriev, Stanislav A. Eroshenko. Membership functions for the formation of the electrical equipment state estimation for power stations and substations // Advanced Materials Research. Vol. 694-697. P. 1329-1333. 2013.
- Alexandra I. Khalyasmaa, Stepan A. Dmitriev. Power equipment technical state assessment principles // 2nd International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE 2013), December 20-21, 2013, Paris, France.

# **ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

## **SYSTEM OF THE EQUIPMENT TECHNICAL CONDITION ESTIMATION OF SUBSTATIONS BASED ON FUZZY LOGIC METHODS**

Хальясмаа А. И., Дмитриев С. А., Кокин С. Е.

Alexandra I. Khalyasmaa, Stepan A. Dmitriev, Sergei E. Kokin

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

### **Аннотация:**

Данная статья посвящена вопросам оценки технического состояния основного оборудования на подстанциях 35-220 кВ с помощью методов нечеткой на основе данных технической диагностики. Представлена методика определения характеристических функций принадлежности к категории состояния оборудования, а также получение обобщенной оценки технического состояния оборудования.

### **Abstract:**

This article deals with technical condition evaluation of the main equipment at substations using fuzzy methods based on technical diagnostics. Provides a methodology to determine the membership functions to equipment condition category, and obtaining a generalized estimation of the equipment technical condition.

**Ключевые слова:** оценка технического состояния, экспертные оценки, нечеткие множества, функция принадлежности.

**Keywords:** technical condition estimation, expert judgment, fuzzy sets, membership function.

### **Введение**

Сегодня вопрос оценки технического состояния (ОТС) электрооборудования на подстанциях (ПС) 35-220 кВ является одним из

актуальных вопросов для современных электрических сетей. Это связано в первую очередь с тем, что большая часть оборудования на ПС используется сверх своего нормативного срока эксплуатации, а значит, ухудшается стабильность показателей качества оборудования. Это означает, что такое оборудование требует повышенного внимания при эксплуатации и применения различных методов контроля его состояния.

Система планово-предупредительных ремонтов (ППР) оборудования на ПС, применяемая сегодня во многих организациях, подразумевает под собой систему технических и организационных мероприятий, направленных на поддержание и (или) восстановление эксплуатационных свойств технологического оборудования и устройств в целом и (или) отдельных единиц оборудования, конструктивных узлов и элементов [1].

Однако система ППР оборудования, требует серьезных финансовых вложений и большой трудоемкости (иногда настолько большой, что для проведения работ недостаточно одного планового периода). Это характеризует систему ППР как недостаточно эффективную ни с технической, ни с экономической точки зрения. Поэтому большинство предприятий, на чьем балансе находятся ПС, стараются перейти от системы ППР к системе обслуживания оборудования по фактическому состоянию.

Такой переход возможен только при условии использования подходов на основе методов технической диагностики, в том числе неразрушающего контроля. Этот выбор обусловлен тем, что для многих видов технической диагностики, во-первых, не требуется вывод из работы оборудования, а во-вторых, существует возможность бесконтактного диагностирования электрооборудования, что решает проблему непрерывной работы оборудования (исключает ущерб от планового вывода из работы) и безопасности эксплуатации электроустановок для персонала соответственно.

На сегодняшний день некоторые виды диагностики являются обязательными и регламентируются нормативными документами РФ для всех или практически всех видов энергетического оборудования. Поэтому

статистика данных технической диагностики присутствует в том или ином виде практически на любом энергетическом объекте, что дает возможность использовать эти данные для ОТС оборудования или интегральной оценки ПС, а также делать прогнозы остаточного ресурса оборудования.

В качестве подтверждения выше сказанному, был выполнен анализ состояния крупного энергоузла электроэнергетической системы Свердловской области, состоящего из 106 ПС напряжением 35–220 кВ в период с 2007 по 2012 гг. Суммарная установленная мощность силовых трансформаторов составляет 1450 МВА. В таблице 1 представлены основные методы диагностики для каждого вида оборудования, выполненные за рассматриваемый период.

Из таблицы 1 видно, что для анализа технического состояния некоторых видов оборудования использовались сразу несколько видов диагностирования, что позволяет в ряде случаев иметь дополнительную информацию о состоянии оборудования.

Отметим, что и использование системы обслуживания оборудования по фактическому состоянию недостаточно для полной и достоверной ОТС оборудования на ПС. Необходима автоматизированная система, способная не только выполнить анализ данных для ОТС, но и в дальнейшем способная оценить риски, а именно, последствия отказов оборудования на ПС.

В подтверждения выше сказанному, заметим, что в настоящее время большинство сетевых предприятий активно занимаются разработкой и внедрением автоматических систем управления активами, одним из основных разделов которой является ОТС оборудования.

Реализация такой системы представляет собой очень сложную задачу, особенно с точки зрения разработки математической модели, в связи с тем, что электрические системы относятся к классу сложных систем, в которых закон распределения воздействующих на комплекс параметров неизвестен. .

Таблица 1

Методы диагностики электрооборудования на ПС 35-110 кВ

Вид оборудования	Методы диагностики электрооборудования				
	Тепловой	Хромато- графический	Акусти- ческий	Электри- ческий	Измерение тангенса угла диэлектрических потерь
Силовой трансформатор	+	+	+	+	+
Трансформатор тока	+	+			
Трансформатор напряжения	+				
Силовой выключатель	+				
Вентильный разрядник и ограничитель перенапряжений нелинейный	+				
Разъединитель	+				
Высоковольтные вводы силовых трансформаторов и опорные изоляторы	+	+	+	+	
Кабельная линия	+			+	
Воздушная линия	+				
Высокочастотный заградитель	+				

Функционирование системы происходит в условиях неопределенности, а, следовательно, переменные системы могут иметь количественно-качественное описание.

### **Применение гибридных моделей для ОТС**

Для моделирования системы ОТС оборудования на ПС применяют различные математические аппараты. В последнее время очень популярно использование методов нечеткой логики, с помощью которых формулируются нечеткие правила выработки решений.

Еще одним методом для моделирования ОТС может быть метод искусственных нейронных сетей (ИНС).

Интересным представляется соотнесение нейронных сетей с моделируемыми объектами. ИНС не моделирует изучаемый объект, она моделирует восприятие этого объекта, преобразование информации о нем и

отнесение его к определенной категории. Несомненно, предварительно требуется "разбить" объект на составные части, продумать способ его представления [2].

Не смотря на некоторые недостатки ИНС, перед другими математическими методами для задачи ОТС оборудования они обладают одним очень важным преимуществом - возможностью обучения в реальном масштабе времени, другими словами, "настройкой" архитектуры сети и весов синаптических связей.

Для обучения ИНС не требуется никакой априорной информации о структуре искомой функциональной зависимости. Нужна лишь обучающая выборка [3], с помощью которой можно найти достаточно "хорошее" решение для плохо формализованной задачи.

В [4] авторами уже были рассмотрены и доказаны возможности применения ИНС для ОТС на основе данных технической диагностики. Но следует отметить, что ИНС в практических условиях мало пригодна. Это связано с тем, что ИНС состоят из большого числа взаимосвязанных простых обрабатывающих элементов (нейронов), что в результате дает огромную вычислительную мощность при использовании параллельной обработки информации [5].

Вследствие чего наибольший интерес представляет применение гибридных моделей для ОТС, включающих в себя нечеткие множества и ИНС. Выглядит это следующим образом: для определения функции принадлежности используют нечеткие множества, а в качестве дефаззификатора выступает ИНС. Такая реализация позволяет воспользоваться преимуществами обоих методов.

Первоочередной задачей для гибридных моделей является задача определения функции принадлежности объекта исследования к какой-либо категории состояния.

Одним из возможных методов определения характеристических функций принадлежности является метод с использованием лингвистических

переменных, т.е. с использованием качественных оценок состояния оборудования.

Формирование функций принадлежности осуществляется на взаимодействии выборки эмпирических данных и системы экспертных оценок (ЭО) оборудования. Решения о состоянии оборудования принимаются на основе мнений квалифицированных специалистов на основе данных технической диагностики.

Тогда для входных данных гибридных моделей, являющихся элементами нечеткого множества  $A_i^k$ , определяется степень принадлежности к этому множеству. Для определения  $A_i^k$  предлагается использование функции принадлежности  $(L-R)$  - типа  $\mu_i(x) \in R \rightarrow [0;1]$  (рис. 1), где  $R$  - множество действительных чисел,  $x$  - нечеткая оценка, выставляемая экспертом для объекта исследования.

Функция принадлежности категории состояния  $i$  записывается в форме композиции  $L$  и  $R$  - функции в следующем виде:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right), & \text{если } a-\alpha < x < a; \\ 1, & x = a; \\ R\left(\frac{x-a}{\beta}\right), & \text{если } a < x < a+\beta; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha > 0$  и  $\beta > 0$  – левый и правый коэффициенты нечеткости соответственно, характеризующие границы категорий состояния представленные в виде пороговых уровней,  $a$  – модальное значение характеристической функции принадлежности.

Рассмотрим принцип формирования ОТС маслонеполненного силового трансформатора на основе данных хроматографического анализа трансформаторного масла (ХАРГ). Категория состояния силового трансформатора представляет собой нечеткое определение, выраженное

нечетким множеством. Для оценки предусмотрены следующие категории состояния: содержание газа меньше допустимого  $SN$ , нормальное (допустимое) содержание газа  $N$ , содержание газа больше допустимого  $NL$ , которые являются лингвистическими термами. Причем множества  $SN$  и  $NL$  определяются как дополнения нечеткого множества  $N$  по следующему выражению:

$$N = SN \cup NL. \quad (2)$$

Причем пересечение множеств  $SN$  и  $NL$  равно пустому множеству. В соответствии со сказанным выше отметим, что характеристические функции принадлежности определяются следующим выражением:

$$\mu_N(x) = 1 - \max(\mu_{SN}(x), \mu_{NL}(x)), \quad (3)$$

где  $\mu_N(x)$  – характеристическая функция принадлежности к состоянию "нормальное содержания газа",  $\mu_{SN}(x)$  – характеристическая функция принадлежности к состоянию "содержание газа меньше допустимого" и  $\mu_{NL}(x)$  – характеристическая функция принадлежности к состоянию "содержание газа больше допустимого". Характеристические функции принадлежности показаны на рисунке 1.

Мнения  $L$  экспертов относительно каждого признака работоспособности (показателя оценки)  $j$  объекта исследования  $k$ , формирующие множество нечетких оценок работоспособности элемента электрической сети (в данном случае силового трансформатора)  $X_{kjl}$ , формализуются путем преобразования к нормализованным значениям с использованием характеристических функций  $i$ . В таблице 1 приведена матрица обработки ЭО.



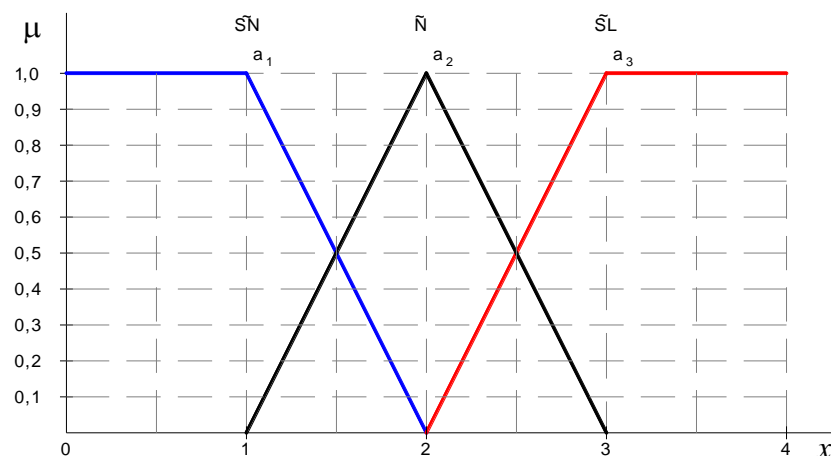


Рис. 1 – Функции принадлежности категориям состояния в зависимости от нечеткой оценочной характеристики экспертов

Таблица 1

Матрица обработки оценок экспертов

Показатель оценки	Эксперт 1	Эксперт 2	Эксперт 3	Эксперт 4	Эксперт $l$
Показатель 1	$\mu_i(x_{k11})$	$\mu_i(x_{k12})$	$\mu_i(x_{k13})$	$\mu_i(x_{k14})$	$\mu_i(x_{k1l})$
Показатель 2	$\mu_i(x_{k21})$	$\mu_i(x_{k22})$	$\mu_i(x_{k23})$	$\mu_i(x_{k24})$	$\mu_i(x_{k2l})$
Показатель 3	$\mu_i(x_{k31})$	$\mu_i(x_{k32})$	$\mu_i(x_{k33})$	$\mu_i(x_{k34})$	$\mu_i(x_{k3l})$
Показатель $j$	$\mu_i(x_{kj1})$	$\mu_i(x_{kj2})$	$\mu_i(x_{kj3})$	$\mu_i(x_{kj4})$	$\mu_i(x_{kjl})$

Значения характеристических функций ЭО приводятся к их модальным значениям  $a_i$ , для которых  $\mu_i(x_{kjl}) = 1$ .

Обобщенная ОТС оборудования рассчитываются на основе средневзвешенной балльной оценки. Для учета интенсивности проявления тех или иных свойств объектов электрической сети предложено использование шкалы Саати  $\{0;1;3;5;7\}$ . Соответственно балл 0 свидетельствует об отсутствии какой-либо значимости характеристики объекта исследования, 1 – об очень слабой значимости, 3 – о слабой значимости, 5 – более или менее существенной значимости, 7 – о сильной значимости оценки.

Вычисление средневзвешенной нормализованной оценки для каждого показателя для объекта исследования выполняется по следующему выражению:

$$C_{kj} = \frac{\sum_{l=1}^L b_{lj} X_{kjl}^H}{\sum_{l=1}^L b_{lj}}, \quad (4)$$

где  $X_{kjl}^H$  – нормализованная оценка эксперта  $l$  относительно показателя  $j$  объекта исследования  $k$ ,  $L$  – общее количество экспертов,  $b_{lj}$  – балл оценочной характеристики суждения эксперта  $l$  относительно показателя  $j$ .

Заметим, что для ХАРГ средневзвешенная оценка (4) рассчитывается для каждого газа, а именно, метана ( $CH_4$ ), диоксида углерода ( $CO_2$ ), этилена ( $C_2H_4$ ), ацетилен ( $C_2H_2$ ), этана ( $C_2H_6$ ), водорода ( $H_2$ ), оксида углерода ( $CO$ ), кислорода ( $O_2$ ), азота ( $N_2$ ).

### **Выводы:**

Оценка технического состояния основного оборудования подстанций является слабо формализованной задачей, которая может быть решена на основе обработки лингвистических переменных. Такие переменные позволяют получить качественную оценку категории состояния объекта исследования с помощью характеристических функций принадлежности. Последнее является задачей, требующей отдельного внимания, так как является первоочередным этапом моделирования гибридных сетей.

Применение средневзвешенных балльных оценок с использованием неравномерной шкалы позволяет получить количественную характеристику состояния электрооборудования. Все выше сказанное делает представленный подход универсальным с точки зрения обработки исходной информации, а также с позиции получения верифицированных оценок состояния.

### **Список литературы:**

7. Система ППР оборудования [Электронный ресурс] // Информационный портал для главного механика: [сайт]. [2013]. URL: <http://themechanic.ru/article/read/sistema-ppr.html> (дата обращения: 20.05.2013).

8. Теория нечетких множеств и нейронные сети [Электронный ресурс] // Градосельская Г.В.: [сайт]. [2013]. URL: [www.hse.ru/data/944/072/1236/Gradoselskaya.doc](http://www.hse.ru/data/944/072/1236/Gradoselskaya.doc) (дата обращения: 20.05.2013).
9. Нейронная настройка лингвистических моделей [Электронный ресурс] // Matlab.Exponenta: [сайт]. [2001]. URL: [http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book5/6\\_1.php](http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book5/6_1.php) (дата обращения: 20.05.2013).
10. Хальясмаа А. И., Дмитриев С. А., Кокин С. Е., Осотова М. В. Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях // Вопросы современной науки и практики. №1(45). 2013.
11. Рутковская Д., Пилинский М., Л. Рутковский. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия - Телеком, 2006. 193 с.

# Membership functions for the formation of the electrical equipment state estimation for power stations and substations

Alexandra I. Khalyasmaa<sup>1, a</sup>, Stepan A. Dmitriev<sup>2, b</sup>, Stanislav A. Eroshenko<sup>3, c</sup>

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002 Russia, Ekaterinburg, 19, Mira street

<sup>a</sup>ikhalyasmaa@mail.ru, <sup>b</sup>dmstepan@gmail.com, <sup>c</sup>stas\_ersh@mail.ru

**Keywords:** state estimation, expert judgements, membership functions, substations.

**Abstract.** This article is devoted to the formation of the electrical equipment state estimation for power stations and substations. The article also addresses to the use of fuzzy logic for the knowledge base formation on the basis of expert judgements using membership functions. The article presents the example of calculation of the electrical equipment state estimation.

## Introduction

Today, the electrical equipment state estimation for power stations and substations is one of the key tasks in power engineering. This is due to the fact that most of the equipment is used in excess of the rated life, and thus is deteriorating the stability of equipment performance criterion. This means that such equipment requires special attention during the operation and application of methods to control its condition [1].

In this article we would like to focus attention on the electrical equipment state estimation, namely, the formation of the initial information. This is due to the fact that the mathematical simulation of stations and substations is complicated problem.

## Methods of mathematical simulation

Today to simulate the system of electrical equipment state estimation at the stations and substations they apply different mathematical methods, but the formation of the initial information, regardless of the method of construction of the model is always performed.

Most of the initial data for systems of estimation of the technical equipment state is based on the interaction of experimental data (the equipment parameters) and the system of expert judgements of equipment. Decisions of the equipment state are made by the opinions of qualified experts on experimental data.

There are many kinds of expert judgements method, some of which became separate regulatory documents. Note that most expert judgements are based on the so-called linguistic variables, which are essentially fuzzy sets. This means that the description of these variables is subjective and depends on the context in which they are used.

Therefore, for most systems of electrical equipment state estimation especially on the basis of expert judgements is necessary to apply terms that characterize the graduation state of equipment, such as unusable, unsatisfactory, satisfactory, good, etc.

Graduation conditions and their number can be different. For automated systems expert judgments formed on the objects, namely, on the basis of expert judgements received on the basis of opinions attending personnel (substations, stations etc.) and then they entered to the general system. Such a division of the process of obtaining estimates of the electrical equipment state firstly is explained a large amount of incoming data with each object, and the secondly highest rate of data updating.

Proficiency of attending personnel depends on the object where it works and can be varied. This means that expert judgements will not sufficiently reliable so as to be completely dependent on the human factor.

Today, many energy companies are trying to move from a system of preventive maintenance to system maintenance on the actual technical state. This means that the importance of the electrical equipment state estimation and the responsibility for the decisions are significantly increased. Therefore the system of expert judgements should be as true and accurate.

Authors for the formation the electrical equipment state estimation in [2] proposed to use the method of artificial neural networks. In this case, the knowledge base will be formed once, then the system will be self-trained. This means that the application of expert judgments will also be required only once, that will improve the accuracy of the result.

For the system of expert judgments it makes sense to use the methods of fuzzy logic, namely fuzzy sets. As you know, every object is characterized by fuzzy membership function, in this case, the membership function is determined for expert judgments.

In forming the membership functions there are important aspects: the type of scale used to describe the membership function and character of the measurements.

Among the groups of methods of construction membership functions, in this case they only apply indirect methods because of expert judgments are the initial information and can be further processed to minimize the errors and determine the value of the membership degree of a particular category of state. Category of state is the fuzzy concept expressed by the fuzzy set.

There are following categories of state: excellent  $H$ , good  $SN$ , normal  $N$ , poor  $SL$ , very poor  $L$ , which are linguistic terms. Each possible state is determined by its membership function  $(L-R)$  - type  $\mu_i(x) \in R \rightarrow [0;1]$  (Fig. 1), where  $R$  - is the set of real numbers,  $x$  - is fuzzy evaluation which expert allots of the object.

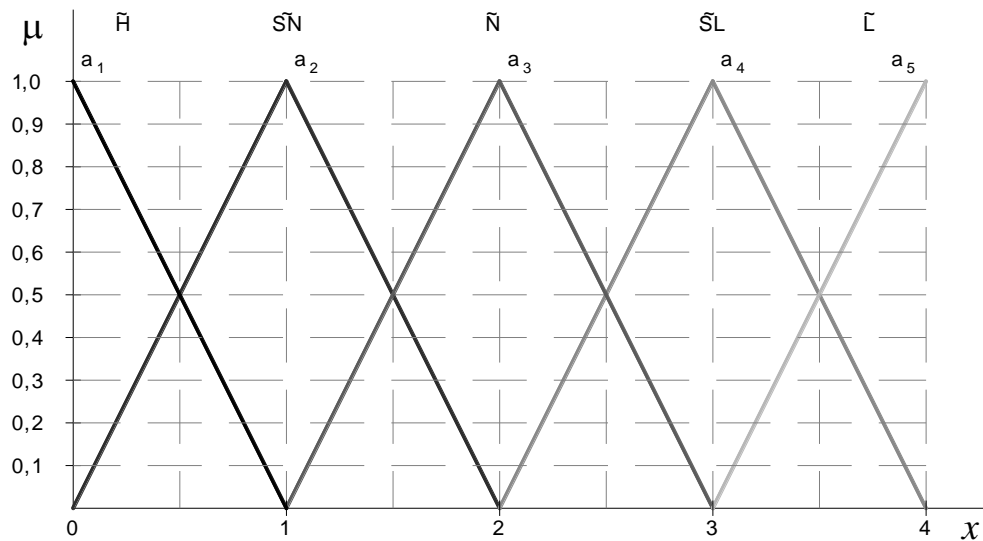


Fig. 1 - Membership functions

Membership function of category of state is the composition of A and V - functions and has the following form:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} L\left(\frac{a-x}{\alpha}\right), & \text{if } a-\alpha < x < a; \\ 1, & x = a; \\ R\left(\frac{x-a}{\beta}\right), & \text{if } a < x < a+\beta; \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (1)$$

where  $\alpha > 0$  and  $\beta > 0$  - left and right coefficients of fuzziness that characterize the boundaries of state categories, presented in the form of threshold levels,  $a$  - the modal value of the characteristic membership function.

$L$  expert opinions on each performance criteria  $j$  of the object  $k$ , form a set of fuzzy estimates performance of electric network element  $X_{kjl}$ . They are formalized by converting to normalized values using the characteristic functions  $i$ . Table 1 shows the matrix processing of expert judgements.

Table 1  
The matrix processing of expert judgements

Performance criteria	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert /
Criterion 1	$\mu_i(x_{k11})$	$\mu_i(x_{k12})$	$\mu_i(x_{k13})$	$\mu_i(x_{k14})$	$\mu_i(x_{k1l})$
Criterion 2	$\mu_i(x_{k21})$	$\mu_i(x_{k22})$	$\mu_i(x_{k23})$	$\mu_i(x_{k24})$	$\mu_i(x_{k2l})$
Criterion 3	$\mu_i(x_{k31})$	$\mu_i(x_{k32})$	$\mu_i(x_{k33})$	$\mu_i(x_{k34})$	$\mu_i(x_{k3l})$
Criterion $j$	$\mu_i(x_{kj1})$	$\mu_i(x_{kj2})$	$\mu_i(x_{kj3})$	$\mu_i(x_{kj4})$	$\mu_i(x_{kjl})$

The values of the characteristic functions of expert judgments are given to their modal values  $a_i$  for which  $\mu_i(x_{kjl}) = 1$ . Generalized estimator of electrical equipment state is calculated on the basis of the weighted average mark estimation of state. To take into account intensity of the manifestations of certain criterion of the objects we use Saaty scale  $\{0;1;3;5;7\}$ . In this case, the point 0 indicates the absence of any importance characteristics of the object, 1 - very low importance, 3 - low importance, 5 - more or less considerable importance, 7 - a strong importance.

The grading scale is associated with categories of state. Good state is associated with the lowest score of importance equal to 0. Very badly state is associated with the maximum score of importance equal to 4. Such a scale can minimize the variance of the generalized estimator of technical state, greatly increasing the importance of the negative estimation characteristics.

Calculation of normalized average score for each criterion of the object is performed according to the following formula:

$$C_{kj} = \frac{\sum_{l=1}^L b_{lj} X_{kjl}^H}{\sum_{l=1}^L b_{lj}}, \quad (2)$$

where  $X_{kjl}^H$  - expert's  $l$  normalized evaluation on the criterion  $j$  of the object  $k$ ,  $L$  - the total number of experts,  $b_{lj}$  - expert's  $l$  score on the criterion  $j$ .

### Calculation example

We consider the example of a generalized expert judgement determination of any criterion performance. Suppose that the in survey on electrical equipment state estimation five experts are involved, and each gave his determination of the state (Fig. 2). Expert opinions processing using the membership functions allows to establish the category of state. The results of these calculations are shown in Table 2.

Table 2

Membership of criterion to the category of state

Experts	Score $x$	$\mu_H$	$\mu_{SN}$	$\mu_N$	$\mu_{SL}$	$\mu_L$
Expert 1	0,65	0,35	0,65	0	0	0
Expert 2	0,80	0,2	0,8	0	0	0
Expert 3	1,70	0	0,3	0,7	0	0
Expert 4	2,15	0	0	0,85	0,15	0
Expert 5	2,75	0	0	0,25	0,75	0

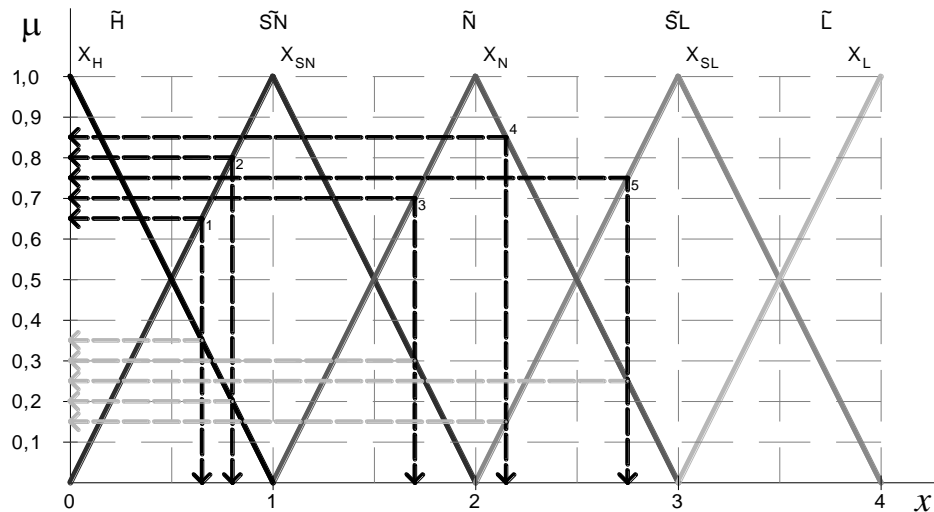


Fig. 2 - Diagram for determining membership estimation characteristics of the category of state

Generalized estimator for this criterion is calculated using the formula:

$$C = \frac{\sum_{l=0}^L b_l X_l^H}{\sum_{l=0}^L b_l} = \frac{1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 3 + 3 \cdot 5}{1 + 1 + 3 + 3 + 5} = 2,23. \quad (3)$$

The obtained value  $C = 2,23$  corresponds to a normal state by 77% and poor state by 23%. Defuzzified value of the generalized expert judgements is 2 and corresponds to the normal state.

Our approach allows us to represent the generalized expert judgements in the form of verbal performance, taking into account the degree of positive effect, and in the form of accurate formal representation on the object state.

## **Conclusion**

The electrical equipment state estimation for power stations and substations is poorly formalized task that can be solved on the basis of processing of linguistic variables. These variables allow for a qualitative estimation of the state of the object category with membership functions. The latter is a task that requires special attention because it is the immediate stage of simulation of hybrid networks.

## **Acknowledgements**

The research was carried out in terms of Ural Federal University development program with the financial support of young scientists

## **References**

- [1] Kokin S.E., Pazderin A.V., Adarichev E.N. Ways of Decreasing Maximum and Equalizing Curve of Big Cities' Power Demand // 1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09; Nanjing; China. 2009. art. no. 5347879.
- [2] . Alexandra I. Khalyasmaa, Stepan A. Dmitriev, Sergey E. Kokin, Marina V. Osotova / Assessing Technical Condition of Power Equipment // Problems of modern science and practice, №1 (45), 2013. P. 289 - 299. (in Russian).



# POWER EQUIPMENT TECHNICAL STATE ASSESSMENT PRINCIPLES

Stepan A. Dmitriev<sup>1a</sup> and Alexandra I. Khalyasmaa<sup>1b</sup>

Russia, Ekaterinburg, Mira Str., 19, Ural Federal University  
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

<sup>a</sup>dmstepan@gmail.com, <sup>b</sup>ikhalyasmaa@mail.ru

**Keywords:** fuzzy logic, artificial neural network, power transformer, state.

**Abstract.** This article is devoted to the principles of power equipment technical state assessment at 35-220 kV substations. The article deals with the network hybrid model construction using methods of fuzzy logic and artificial neural network. Finally, in order to construct the knowledge base, a methodology of the power equipment technical state assessment, based on the membership functions, is introduced.

## Introduction

Power equipment technical state assessment at 35-220 kV substations is an actual problem for grid companies of Russia. This is due to the fact that most of the equipment at the substations is operated outside the limits of its allowable service lifetime, which leads to deterioration of the equipment quality indexes and requires special attention during the operation and additional application of control methods[1].

It is possible to use different mathematical methods for power equipment technical state assessment system modeling. However, for automated systems of power equipment technical state assessment (the integral part of the Enterprise Asset Management (EAM) systems) it is necessary to introduce a mathematical method, which not only provides the reliability and accuracy of the results but also does not overflow assessment system with excessive data. The optimal mathematical method to solve this problem is hybrid network analysis, which is the combination of fuzzy logic and artificial neural networks (ANN) methodologies.

The power equipment technical state assessment at 35-220 kV substations can be considered as an applied problem, the solution of which presupposes not only numerical but also linguistic data. An example of linguistic data are expert judgments of various equipment states. Kinds and quantity of states may be different depending on the purposes of investigation.

The expert judgments for power equipment technical state assessment are usually formed by the staff at the objects (at the substations) and after that this information is recorded into EAM system. Such implementation is conditioned by the large number of data, incoming into EAM system from each object. Moreover, frequent update is required for accurate assessment [2]. In this case, the expert judgments are subjective, so the algorithm is required to calculate the final assessment, basing on the judgments of several experts. For these reasons, hybrid models attracted much attention from the scientists.

## Hybrid networks

The main idea of hybrid networks methodology is membership functions determination using fuzzy sets, where defuzzification is performed using ANN. This implementation allows to take advantage of both methods and helps to get rid of input data "scale" and to construct the knowledge database more compactly and efficiently. 35-220 kV substation equipment technical state assessment is carried out using hybrid training algorithm of fuzzy control module, the block diagram of which is presented in Figure 1.

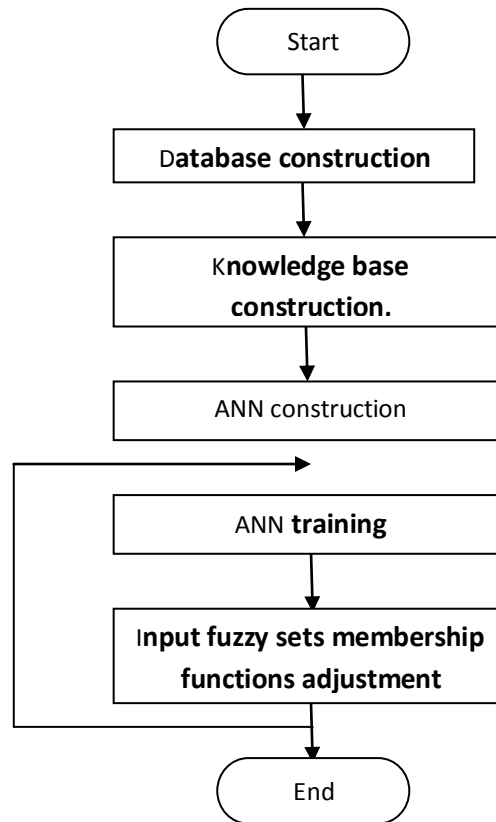


Fig. 1. Block-diagram of fuzzy control module hybrid training algorithm

Integral assessment of substations requires separate fuzzy control module algorithm for each type of equipment. Technical state assessment is carried out for the following type of equipment:

- 110 kV switchgear;
- 35 kV switchgear;
- 10 kV switchgear;
- power transmission lines;
- power transformers;
- relay protection and emergency automation;
- reactors.

It is notable, that switchgear objects are combined of separate equipment units: bus sections, circuit breakers, disconnectors, current transformers, voltage transformers, surge arresters. Each unit consists of components. For example, the power transformer consists of the following components: magnetic system, windings, transformer oil, tap changer, high-voltage bushing, cooling system, transformer tank etc. Thus, the algorithm of fuzzy control module is used for power equipment technical state assessment in three stages: the stage of power equipment units assessment (including their internal components; the stage of combined objects assessment; the stage of the entire substation objects assessment.

#### **Power transformer state**

The primary task of the hybrid algorithm is object membership function determination in accordance with the given state categories, which is carried out to construct the knowledge base, which will be adjusted by ANN during the training stage. One of the possible methods to determine the characteristic membership function is the application of linguistic variables, i.e. using qualitative assessments of the power equipment.

Classification of the equipment technical state is performed using R-L type membership functions. The authors introduce four main equipment states, referred to equipment operability:

- good condition  $D_1$ , when the equipment meets all technical requirements. Good condition is always an operable one;
- fault and operable condition  $D_2$ , when technical requirements are met for object properties, which characterize the ability to perform predetermined functions;
- fault and inoperable condition (repairable)  $D_3$ , when the equipment is unable to perform the predetermined function, but it is possible and economically feasible to carry out service works;
- inoperable and non-repairable  $D_4$ , when service is technically impossible or economically unfeasible [3].

These states  $D_1...D_4$  can be defined by triangular fuzzy membership functions  $\mu_i(x) \in R \rightarrow [0;1]$ , where  $R$  - the set of real numbers;  $x$  - fuzzy normalized assessment that is assigned to the indicator of object operability. Membership function (Fig. 2) is equal to 1, if operability index fully exhibits the property under consideration and equals 0, if operability index doesn't possess the given property at all.

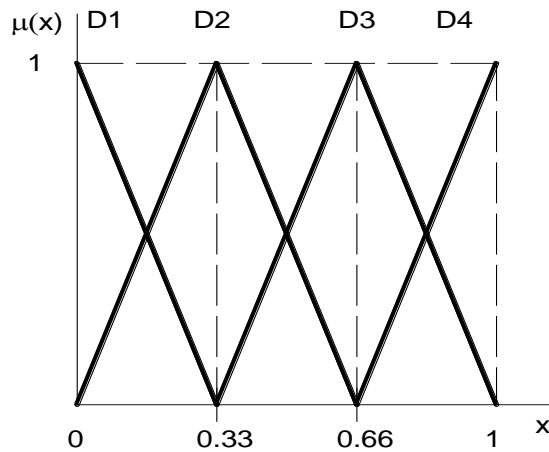


Fig. 2. Membership functions for states  $D_1...D_4$

The construction of the membership functions is performed on the basis of the state rank - rank 0 is assigned to the operable condition, and rank 3 is assigned to inoperable condition. Technical diagnostics results and expert judgments of qualified personnel are considered as assessment criteria. The list of the indicators for the power transformers is presented in Table 1. Each indicator has its own operating range limited by a minimum and/or maximum values. In case the bounds of the range are exceeded, the state is considered to be shifted from the normal technical state. In the simplest case, the normalized operability indicators may be determined using the rules, shown in Table 2.

Table 1  
Indicators of 220 kV power transformer

No	Indicator	max	min
1	H <sub>2</sub> , %	0,01	–
2	CH <sub>4</sub> , %	0,01	–
3	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , %	0,01	–
4	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , %	0,005	–
5	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , %	0,001	–
6	CO <sub>2</sub> , %	0,6	–
7	CO, %	0,05	–
8	CO <sub>2</sub> /CO	13	5
9	Moisture content, g/t	25	–

10	"Ionol" additive concentration, %	–	0,1
11	Breakdown voltage, kV	–	45
12	Acid number, mgKOH/g	0,25	–
13	Closed flash point, °C	–	125
14	Industrial purity class	13	–
15	The tangent of the oil at 90°C, %	10	–
16	Polymerization degree	–	250
17	Solid insulation moisture content, %	2	–
18	Winding insulation resistance R60 (HV/MV/LV), obtained during the recent tests, normalized to 20°C, Mom	–	300
19	Winding insulation resistance R60 variation (HV/MV/LV), %	–	-50
20	Winding insulation tangent (HV/MV/LV), obtained during the recent tests, normalized to 20°C, %	1	–
21	Winding insulation tangent variation (HV/MV/LV), %	50	–
22	The maximum difference between active resistance R (for windings HV/MV/LV at the nominal tap position), %	2	-2
23	The maximum difference between phase short-circuit resistances Zsc, %	3	-3
24	The difference of no-load losses from the rated value, %	30	–
25	The breakdown voltage of oil from the tank of the tap changer, kV	–	25
26	The moisture content of the oil from the tank of the tap changer, g/t	30	–
27	The maximum difference Rwind. Of the tap changer, %	2	-2
28	The maximum difference Rwind.of the off-circuit tap changer, %	2	-2

Table 2  
Rules for determining the normalized assessments

Indicator	Max	Min	Rules
$x_1$	0,01, %	–	<i>if <math>x_1 &lt; 0,01</math> then <math>x_{n1} = 0</math>, else <math>x_{n1} = 1</math></i>
$x_2$	0,01, %	–	<i>if <math>x_2 &lt; 0,01</math> then <math>x_{n2} = 0</math>, else <math>x_{n2} = 1</math></i>
$x_3$	0,01, %	–	<i>if <math>x_3 &lt; 0,01</math> then <math>x_{n3} = 0</math>, else <math>x_{n3} = 1</math></i>
$x_4$	0,005, %	–	<i>if <math>x_4 &lt; 0,005</math> then <math>x_{n4} = 0</math>, else <math>x_{n4} = 1</math></i>
$x_5$	0,001, %.	–	<i>if <math>x_5 &lt; 0,001</math> then <math>x_{n5} = 0</math>, else <math>x_{n5} = 1</math></i>
$x_6$	0,6, %	–	<i>if <math>x_6 &lt; 0,6</math> then <math>x_{n6} = 0</math>, else <math>x_{n6} = 1</math></i>
$x_7$	0,05, %	–	<i>if <math>x_7 &lt; 0,05</math> then <math>x_{n7} = 0</math>, else <math>x_{n7} = 1</math></i>
$x_8$	13, %	5	<i>if <math>x_8 &lt; 13</math> and <math>x_8 &gt; 5</math> then <math>x_{n8} = 0</math>, else <math>x_{n8} = 1</math></i>
$x_9$	25, g/t	–	<i>if <math>x_9 &lt; 25</math> then <math>x_{n9} = 0</math>, else <math>x_{n9} = 1</math></i>
$x_{10}$	–	0,1, %	<i>if <math>x_{10} &gt; 0,1</math> then <math>x_{n10} = 0</math>, else <math>x_{n10} = 1</math></i>
$x_{11}$	–	45, kV	<i>if <math>x_{11} &gt; 45</math> then <math>x_{n11} = 0</math>, else <math>x_{n11} = 1</math></i>
$x_{12}$	0,25, mgKOH/g	–	<i>if <math>x_{12} &lt; 0,25</math> then <math>x_{n12} = 0</math>, else <math>x_{n12} = 1</math></i>
$x_{13}$	–	125, °C	<i>if <math>x_{13} &gt; 125</math> then <math>x_{n13} = 0</math>, else <math>x_{n13} = 1</math></i>
$x_{14}$	13	–	<i>if <math>x_{14} &lt; 13</math> then <math>x_{n14} = 0</math>, else <math>x_{n14} = 1</math></i>
$x_{15}$	10, %	–	<i>if <math>x_{15} &lt; 10</math> then <math>x_{n15} = 0</math>, else <math>x_{n15} = 1</math></i>
$x_{16}$	–	250	<i>if <math>x_{16} &gt; 250</math> then <math>x_{n16} = 0</math>, else <math>x_{n16} = 1</math></i>
$x_{17}$	2, %	–	<i>if <math>x_{17} &lt; 2</math> then <math>x_{n17} = 0</math>, else <math>x_{n17} = 1</math></i>
$x_{18}$	–	300, MOM	<i>if <math>x_{18} &gt; 300</math> then <math>x_{n18} = 0</math>, else <math>x_{n18} = 1</math></i>
$x_{19}$	–	-50, %	<i>if <math>x_{19} &gt; 50</math> then <math>x_{n19} = 0</math>, else <math>x_{n19} = 1</math></i>
$x_{20}$	1, %	–	<i>if <math>x_{20} &lt; 1</math> then <math>x_{n20} = 0</math>, else <math>x_{n20} = 1</math></i>
$x_{21}$	50, %	–	<i>if <math>x_{21} &lt; 50</math> then <math>x_{n21} = 0</math>, else <math>x_{n21} = 1</math></i>
$x_{22}$	2, %	-2, %	<i>if <math>x_{22} &lt; 2</math> and <math>x_{22} &gt; -2</math> then <math>x_{n22} = 0</math>, else <math>x_{n22} = 1</math></i>
$x_{23}$	3, %	-3, %	<i>if <math>x_{23} &lt; 3</math> and <math>x_{23} &gt; -3</math> then <math>x_{n23} = 0</math>, else <math>x_{n23} = 1</math></i>
$x_{24}$	30, %	–	<i>if <math>x_{24} &lt; 30</math> then <math>x_{n24} = 0</math>, else <math>x_{n24} = 1</math></i>

$x_{25}$	–	25, kV	<i>if <math>x_{25} &gt; 25</math> then <math>x_{n25} = 0</math>, else <math>x_{n25} = 1</math></i>
$x_{26}$	30, g/t	–	<i>if <math>x_{26} &lt; 30</math> then <math>x_{n26} = 0</math>, else <math>x_{n26} = 1</math></i>
$x_{27}$	2, %	-2, %	<i>if <math>x_{27} &lt; 2</math> and <math>x_{27} &gt; -2</math> then <math>x_{n27} = 0</math>, else <math>x_{n27} = 1</math></i>
$x_{28}$	2, %	-2, %	<i>if <math>x_{28} &lt; 2</math> and <math>x_{28} &gt; -2</math> then <math>x_{n28} = 0</math>, else <math>x_{n28} = 1</math></i>

To take into account appearance intensity of a certain criterion, Saaty scale is used  $\{0;1;3;5;7\}$ . Saaty scale is also used to identify the degree of importance of the certain state. Table 3 shows an example of calculating the equipment technical state assessment for three power transformers using proposed methodology. As a result, transformer T1 state was rated good; fault inoperable, but repairable condition was assigned to transformer T2; transformer T3 state was regarded to be inoperable and non-repairable, because the technical state assessment revealed 12 non-conforming indicators (the total assessment index equals to 0.84).

Table 3  
Equipment technical state assessment for three power transformers

Indicator	Transformer T1		Transformer T2		Transformer T3	
	Value of indicator	Normalized value	Value of indicator	Normalized value	Value of indicator	Normalized value
$x_1$	0,009	0	0,015	1	0,015	1
$x_2$	0,009	0	0,01	1	0,01	1
$x_3$	0,007	0	0,06	1	0,06	1
$x_4$	0,003	0	0,06	1	0,06	1
$x_5$	0	0	0,0009	0	0,0009	0
$x_6$	0,06	0	0,4	0	0,4	0
$x_7$	0,003	0	0,04	0	0,04	0
$x_8$	10	0	14	1	14	1
$x_9$	20	0	20	0	20	0
$x_{10}$	0,2	0	0,2	0	0,1	1
$x_{11}$	50	0	46	0	46	0
$x_{12}$	0,2	0	0,2	0	0,2	0
$x_{13}$	160	0	121	1	121	1
$x_{14}$	10	0	10	0	10	0
$x_{15}$	9	0	9	0	9	0
$x_{16}$	300	0	260	0	230	1
$x_{17}$	1	0	1	0	1	0
$x_{18}$	350	0	330	0	330	0
$x_{19}$	-40	0	-40	0	-40	0
$x_{20}$	0,5	0	0,5	0	0,5	0
$x_{21}$	30	0	40	0	40	0
$x_{22}$	1	0	1	0	3	1
$x_{23}$	0	0	-1	0	3	1
$x_{24}$	5	0	20	0	20	0
$x_{25}$	30	0	25	1	25	1
$x_{26}$	20	0	25	0	25	0
$x_{27}$	0	0	0	0	0	0
$x_{28}$	0	0	1	0	2	1
Generalized assessment	$D_1$	0	$D_3$	0,7	$D_4$	0,84

## Conclusion

This article shows the example of the power equipment technical state assessment determination. Power transformers state assessment was represented in both quantitative and qualitative forms. Such equipment assessment technology can become the first step in intelligent control systems development.

### **Acknowledgements**

The research was carried out in terms of Ural Federal University development program with the financial support of young science department.

### **References**

- [1] I. A. Birger. Technical Diagnostics (Mechanical engineering, Russia, 1978) (in russian).
- [2] Kokin S.E., Pazderin A.V., Adarichev E.N. Ways of Decreasing Maximum and Equalizing Curve of Big Cities' Power Demand // SUPERGEN '09; Nanjing; China. 2009. art. no. 5347879.
- [3] Kokin S.E., Dmitriev S.A., Khalyasmaa A.I. Evaluation Model for Urban Power Supply Systems // Advanced Materials Research. 2012. Vols. 468-471. pp. 1642-1648.